

陕西黄河流域植被碳利用率时空特征及对气候的敏感性研究

王娟^{1,2}, 王钊^{1,2}, 郭斌^{3,4}, 何慧娟^{1,2}, 董金芳^{1,2}

(1. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 陕西 西安 710014; 2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 陕西 西安 710014; 3. 中国气象局成都高原气象研究所, 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 4. 四川省阿坝州气象局, 四川 马尔康 624000)

摘要: 植被碳利用率(Carbon Use Efficiency, CUE)能够较客观地反映植被固定大气碳的效率以及植被对气候变化产生的反馈。利用MOD17、土地利用数据及气象数据,应用Hurst指数、相关分析及敏感性分析等方法,探讨了2001—2021年陕西黄河流域植被CUE时空变异及其对气候因子的敏感性。结果表明:(1) 2001—2021年陕西黄河流域植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)及植被CUE呈上升趋势,植被CUE均值为0.51。(2) 研究区仅有14.21%的区域植被CUE呈下降趋势,植被CUE高值区主要集中在陕北防风固沙区及退耕还林区,未来植被CUE呈现下降趋势的面积占59.96%,且大部分为上升转下降趋势。(3) 气温、降水与植被CUE总体均呈负相关,但与降水的关系较气温更为显著,与气温、降水呈正相关关系的地区分布在陕北防风固沙区;对气温与降水的敏感系数分析表明,植被CUE与气温及降水的阈值分别为10℃及500mm,在气温<10℃、降水量<500mm时植被CUE随气温及降水的增加而增加。植被CUE与气候因子的关系在陕北退耕还林区及防风固沙区等干旱地区较为显著,且敏感性更强。

关键词: 植被CUE; 时空特征; Hurst指数; 气候因子; 敏感性; 黄河流域

植被是调节和促进生态系统碳循环过程的关键因素,它通过光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等将土壤、大气和水分连接为一个整体,并渗透入生态系统能量流动和物质循环的各个重要环节^[1]。大气中有1/3的碳都被陆地生态系统固定^[2],植被碳利用率被定义为植被净初级生产力和总初级生产力的比值,是表征植被生长发育过程中最终被固定在新组织中的总同化碳,反映了植被固定大气碳的效率以及植被对气候变化产生的反馈。

植被碳利用率(Carbon Use Efficiency, CUE)在早期研究中被认为是一个稳定且与环境变量和空间尺度无关的常量^[3],是植被生产力模型的一个假设条件^[4-5]。但深入研究发现,植被CUE对环境变化的敏感性高,不同植被类型CUE差异性大,不同空间尺度的植被CUE差异性亦较大^[6],因此,不能仅把

植被CUE作为常量。基于全球尺度的遥感观测结果表明,植被CUE随气候、区域和植被类型变化差异性较大^[5,7]。Zhang等^[6]对全球植被研究发现,降雨量在一定阈值之上,植被CUE变化较小,但小于此阈值时植被CUE与降雨量呈负相关关系;安相等^[8]研究发现,东亚地区不同植被类型植被CUE差异较大;刘洋洋等^[9]研究表明,全国范围内随着气候变化与植被类型变化,植被CUE与气温呈负相关,与降水呈正相关;陈智^[10]研究发现,年降水量的增加是驱动东北森林生态系统植被CUE波动增加的主要因素;郑飞鸽等^[11]研究表明,三江源植被CUE与同期气温呈正相关关系,而与降水量呈负相关关系。不同植被类型与气候因子的关系也不尽相同。Gang等^[11]研究发现,草地CUE与降雨呈正相关关系;罗赵慧等^[12]研究发现,粤港澳大湾区不同植被类型植

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-09-13

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金面上项目(2023-JC-YB-279);陕西省自然科学基金青年项目(2022JQ-232);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放课题(2022G-12)

作者简介: 王娟(1981-),女,硕士,高级工程师,主要研究生态环境遥感. E-mail: wangj_81@126.com

通讯作者: 何慧娟. E-mail: 393621703@qq.com

被 CUE 差异较大,但均与气温、降水呈正相关关系。由于植被 CUE 不同空间尺度差异较大,且对气候变化十分敏感,已有研究中鲜有针对陕西黄河流域植被 CUE 的相关报道,针对我国大尺度范围研究仅仅只定量分析了气候因子与植被 CUE 之间的关系,并未深入探究植被 CUE 对气候因子变化的敏感性,因此,有必要加强对陕西黄河流域植被 CUE 未来预测及气候因子敏感性分析。

陕西黄河流域地处黄土高原丘陵沟壑区,区域年降水量少且降水时空分布不均,水土流失较为严重,植被生长环境较为脆弱,对气候变化和人类活动极为敏感^[13],因此,探明该区域植被 CUE 时空特征及其对气候的响应,有助于了解气候变化背景下陕西黄河流域植被 CUE 变化机理,揭示植被 CUE 对气候变化的响应。本文通过应用 Hurst 指数及敏感性指数等统计分析方法,研究陕西黄河流域植被 CUE 时空特征、未来变化趋势及气候敏感性,定量描述植被 CUE 对气候因子的响应,以期了解气候变化下研究区植被 CUE 的变化,为实现碳中和、碳达峰提供科学依据,对于未来研究区生态系统碳循环变化提供数据支撑及实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西黄河流域位于整个黄河流域中段,区域从榆林市的府谷县开始到渭南市的潼关县为止的黄河部分,位于 106.35°~111.31°E, 33.66°~39.54°N 之间,海拔 309~3546 m 之间(图 1)。区域年降水量少且降水时空分布不均,年均降水量 500 mm 左右,水土流失较为严重,植被生长环境较为脆弱,对气候变化和人类活动极为敏感,1999 年开始实施退耕还林(草)工程,使得区域植被覆盖得到迅速恢复和增加,成为全国增绿幅度最大的核心区域^[14-15]。

1.2 数据来源

植被生产力(GPP、NPP)数据来源于 NASA EOS/MODIS 系列产品数据集分别是 MOD17A2HGF 和 MOD17A3HGF,下载地址为 <https://ladsweb.nasa.gov/data/search.html>,时间序列选取 2001—2021 年,空间分辨率为 500 m×500 m,时间分辨率为 1 a 和 8 d,数据格式为 GeoTIFF。采用 MRT 对 2001—2021 年 GPP 和 NPP 数据进行投影变换,影像裁剪等处理,采用 UTM/WGS-1984 坐标系,并通过 ArcGIS

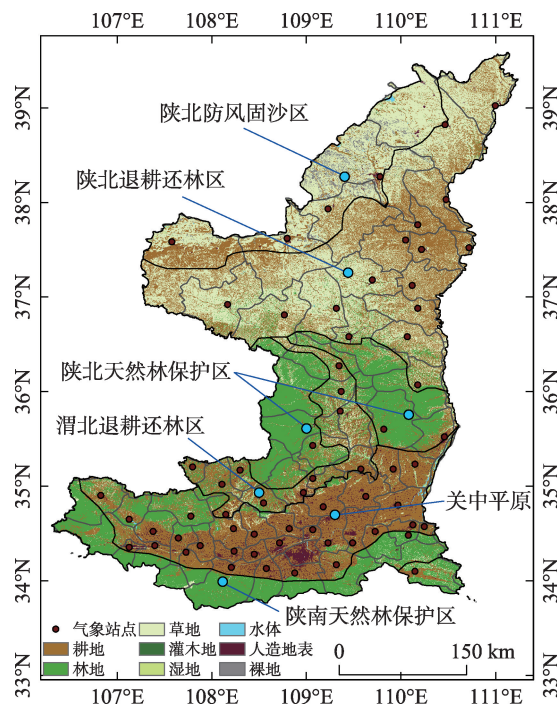


图 1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

10.5 进行异常值剔除,将 8 d GPP 数据进行累积,得到 GPP 年值,最后计算 NPP 年值与 GPP 年值比值,得到研究区植被 CUE 数据集。MODIS 植被生产力数据集的可靠性已通过实测数据及全球各地区应用得到了验证^[15-17]。

气候数据来源于陕西省气象信息中心,包括 2001—2021 年日气温(℃)、降雨(mm),选取流域 67 个气象站点观测数据,采用“标准克里金”法进行插值,重采样到与植被 CUE 相同(500 m×500 m)。

土地利用数据选取 2020 年全球 30 m 地表覆被全要素数据产品(GlobeLand30),下载地址 <http://www.globallandcover.com/>。数据包括耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川及永久积雪 10 种地表覆盖类型。GlobeLand30 V2020 数据的总体精度为 85.72%, Kappa 系数 0.82 符合分类精度要求。吴宗洋等^[18]对黄河流域 GlobeLand30 V2020 数据进行精度评价,总体精度(OA)为 85.32%, Kappa 系数为 81.22%,较百米级以上的数据精度更高,适用于陕西黄河流域土地利用分析。

1.3 研究方法

1.3.1 植被 CUE 估算 植被 CUE 是植被将大气中碳转化到植被自身体内的能力,可表示为植被 NPP 与 GPP 的比值,其计算公式如下:

$$CUE = \frac{NPP}{GPP} = \frac{GPP - R_a}{GPP} = \frac{1 - R_a}{GPP} \quad (1)$$

式中:CUE表示植被碳利用率;NPP表示植被净初级生产力($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$);GPP表示植被总初级生产力($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$); R_a 表示植被自养呼吸消耗碳量($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.3.2 变化趋势预测 Hurst 指数被广泛应用于时间序列未来变化趋势^[19-20],应用R/S分析法其计算思路为:对于某时间序列 L ,将其等分为长度为 b 的 N 个连续但不重叠的子序列,首先计算各子序列的均值和累计离差,分别记为 A_b 和 S_b ,然后计算其极差和各子序列的离差平方的标准差,分别记为 R_b 和 D_b ,最后计算重标极差 $\left(\frac{R}{D}\right)_b$,公式如下:

$$\left(\frac{R}{D}\right)_b = \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N \frac{R_b}{D_b} \quad (2)$$

将 b 不断扩大,重复以上步骤,直至等于 L 。最后以 $\ln\left(\frac{R}{D}\right)_b$ 为纵坐标, $\ln(b)$ 为横坐标绘图,通过线性拟合得到的回归系数记为Hurst指数。

1.3.3 敏感性系数 采用敏感性系数分析植被CUE对气候因子的敏感性^[21],计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\bar{X}}{\bar{P}} \cdot \frac{\sum (X_i - \bar{X})(P_i - \bar{P})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中: ε 表示植被CUE对气候因子的敏感系数(%),指气候因子变化1%所引起的植被CUE变化^[20]; i 表示时间序列的年份; X_i 表示气象要素; P_i 为植被CUE; \bar{X} 和 \bar{P} 分别为气候因子和植被CUE多年均值。

2 结果与分析

2.1 植被GPP、NPP及植被CUE的年际变化特征

2001—2021年陕西黄河流域植被GPP年累计值范围为 $420 \sim 780 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,多年均值为 $627.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,利用5 a滑动平均进行变化趋势模拟,近22 a区域植被GPP变化呈现波动增加趋势,2001—2016年植被GPP上升较快,2016年后植被GPP增速减少(图2a);植被NPP多年均值为 $363.60 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,变化趋势总体与植被GPP一致呈现波动增加趋势,但植被NPP在2012年达最大值后保持在高位波动,增速由2001—2012年间的 $10.69 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下降到2013—2021年间的 $0.99 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,下降明显(图2a)。2001—2021年植被CUE均值为0.51,范围在 $0.54 \sim 0.64$ 之间,区域植被CUE呈现波动增加趋势,年际变化率为0.0009,2014年之前植被CUE增速较快,年际变化率达0.005,2014年后植被CUE在波动中呈下降趋势(图2b)。陕西黄河流域自1999年以来全面实施退耕还林、封山禁牧政策,植被覆盖度迅速增加,植被生长状况向好,李登科等^[15]研究表明,2012年陕西省植被覆盖度达最大值,随后在高位波动,植被GPP、NPP及植被CUE随覆盖度的增加而增加,且均呈波动上升的变化趋势,但植被NPP、GPP及植被CUE到达高值时间略有不同。

2.2 植被CUE空间分布

2001—2021年陕西黄河流域植被GPP及NPP均值空间分布基本一致(图3a,图3b)。高值区集中在陕南天然林保护区西部及陕北天然林保护区,GPP高值在 $900 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,NPP高值在 $500 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。

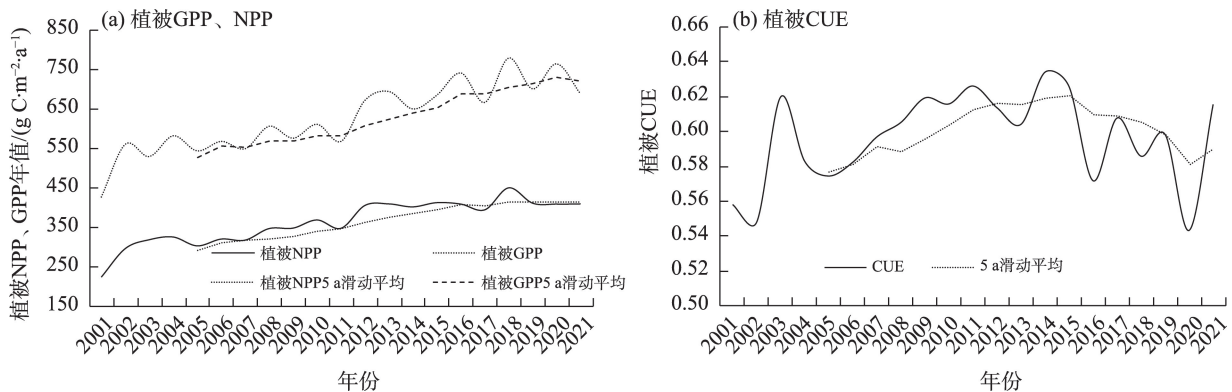


图2 陕西黄河流域2001—2021年植被CUE、NPP及CUE年际变化

Fig. 2 Annual variations of vegetation CUE, GPP and NPP in the Yellow River Basin of Shaanxi from 2001 to 2021

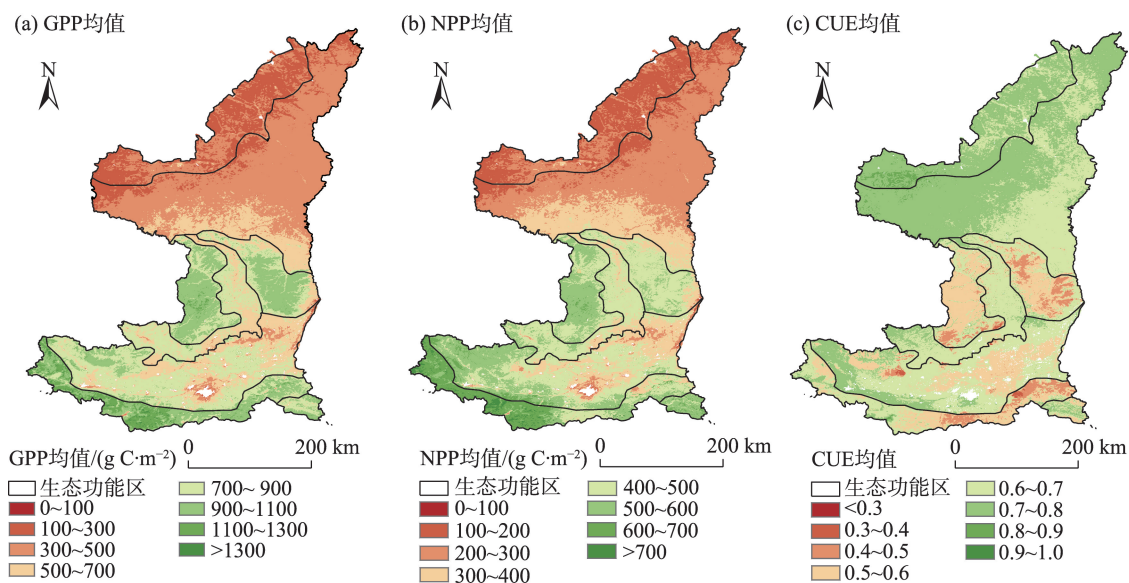


图3 2001—2021年植被GPP、NPP及CUE均值空间分布

Fig. 3 Distribution of annual mean values of vegetation GPP, NPP and CUE from 2001 to 2021

$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, GPP及NPP均值在 $300 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下的区域主要分布在陕北防风固沙区, 其次是陕北退耕还林区北部。植被CUE高值区主要分布在陕北防风固沙区及退耕还林区, 其均值在0.6以上, 小于0.4的区域主要零星分布于关中平原及陕南退耕还林区(图3c)。从GPP、NPP及CUE标准差分布来看, 2001—2021年陕北退耕还林区南部, 天然林保护区大部及关中西部、陕南天然林保护区西部植被GPP、NPP波动较大(图4a, 图4b), 植被CUE波动较大的

区域主要分布在防风固沙区西部标准差在0.6以上, 其次是陕北退耕还林区大部标准差在0.35以上, 关中平原、陕北天然林保护区及陕南天然林保护区植被CUE波动较小, 其标准差在0.3以下(图4c), 波动较大的区域生态环境变化较大, 植被生长易受环境影响。

2.3 植被CUE变化趋势

2001—2021年植被CUE年际变化趋势空间分布如图5a所示, 仅有14.21%的区域呈下降趋势, 下

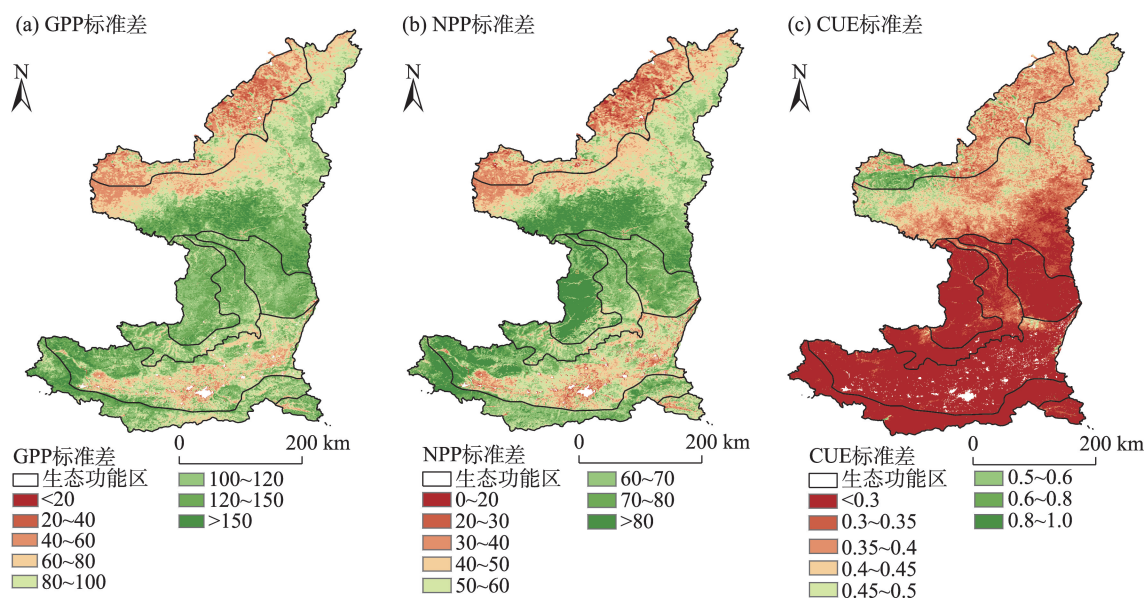


图4 2001—2021年植被GPP、NPP及CUE标准差空间分布

Fig. 4 Spatial patterns of standard deviation of vegetation GPP, NPP and CUE from 2001 to 2021

降的区域主要分布在关中平原南部及陕南退耕还林区部分地区,但绝大部分地区均为不显著下降,其余地区均呈上升趋势,其中,13.40%的区域显著上升($P<0.05$)。从变化速率来看,上升速率一般在0.006以上的区域包括陕北天然林保护区、关中地区的太白山及秦岭北麓地区,其次是榆林西北部地区变化速率为0.003~0.006之间,其余上升区域的变化速率在0~0.003之间,呈下降趋势的区域下降速率一般在-0.006~-0.003之间。

陕西黄河流域 Hurst 指数平均值为0.49, Hurst 指数小于0.5,表明未来保持一定时间相关性,但呈现反向持续作用,因此,研究区植被 CUE 未来总体呈下降趋势。研究区小于0.5的区域占65.00%,主要分布在陕北天然林保护区、退耕还林区及防风固沙区。将植被 CUE 变化趋势与 Hurst 指数叠加耦合分析(图5b),研究区植被 CUE 在未来总体呈现下降趋势,占研究区总面积的59.96%,其中,仅4.57%区域呈现持续下降趋势,其他下降的区域为在未来由上升转为下降,占总面积的55.39%,包括陕北天然林保护区、退耕还林区及防风固沙区大部分区域。植被 CUE 在未来呈上升趋势的区域占总面积的40.04%,其中,30.44%的区域为持续上升,主要集中在陕北退耕还林区及防风固沙区西部、关中平

原北部地区,仅有9.60%的区域在未来由下降转为上升趋势,零星分布在关中平原西南部及陕北退耕还林区南部。

2.4 植被 CUE 与气候因子的关系

研究区植被 CUE 与气温的相关性以负相关为主(图6a),呈负相关的区域所占比例达62.55%,其中,呈显著负相关的区域占比仅为9.53%,主要分布在陕北天然林保护区东部、关中平原南部及陕南天然林保护区北部。植被 CUE 与降水的相关关系整体呈负相关关系(图6b),植被 CUE 与降雨呈负相关的区域所占比例为69.38%,但几乎均为不显著负相关,呈显著正相关的区域所占比例为12.52%,主要分布在陕北防风固沙区及退耕还林区东北部。植被 CUE 与日照时数呈正相关的区域占比为45.55%(图6c),正负相关呈两极分化,但未通过显著性检验的区域占比高达97.68%,呈正相关较高的区域主要分布在陕北天然林保护区及秦岭北麓等以森林为主的植被类型地区。日照时数仅有0.32%的区域呈显著正相关,因此,陕西黄河流域植被 CUE 受气温、降水的影响较日照时数显著。

进一步探究研究区植被 CUE 对气候因子的敏感性,研究区植被 CUE 对气温敏感性系数正值占区域面积比为37.45%,集中分布在陕北退耕还林及防

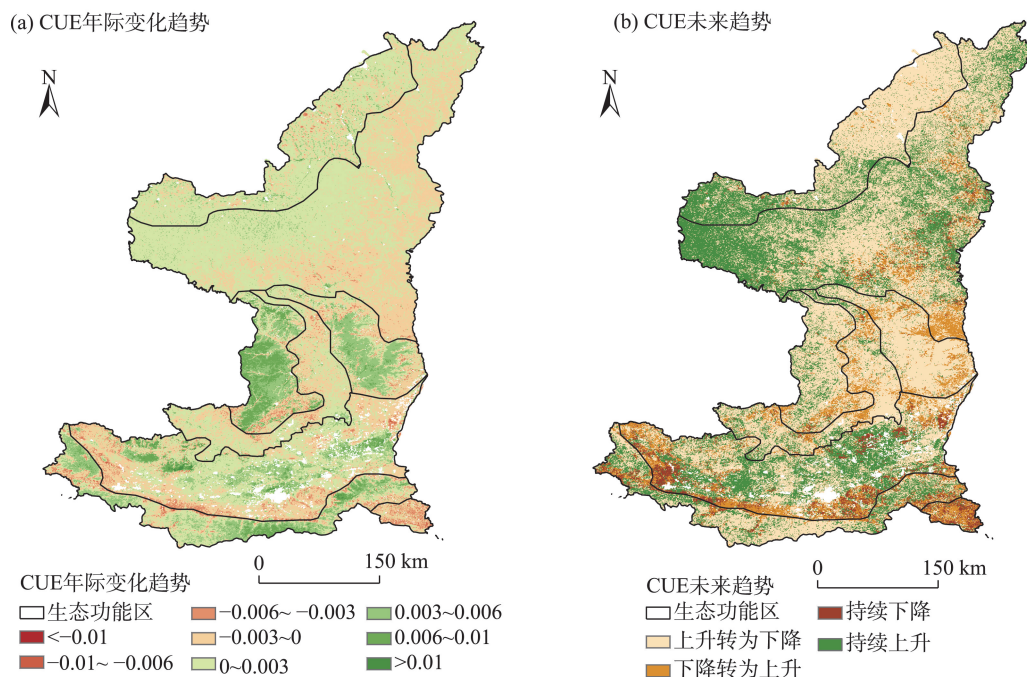


图5 2001—2021年植被 CUE 年际变化趋势及未来变化趋势
Fig. 5 Annual variation of vegetation CUE and the future trend from 2001 to 2021

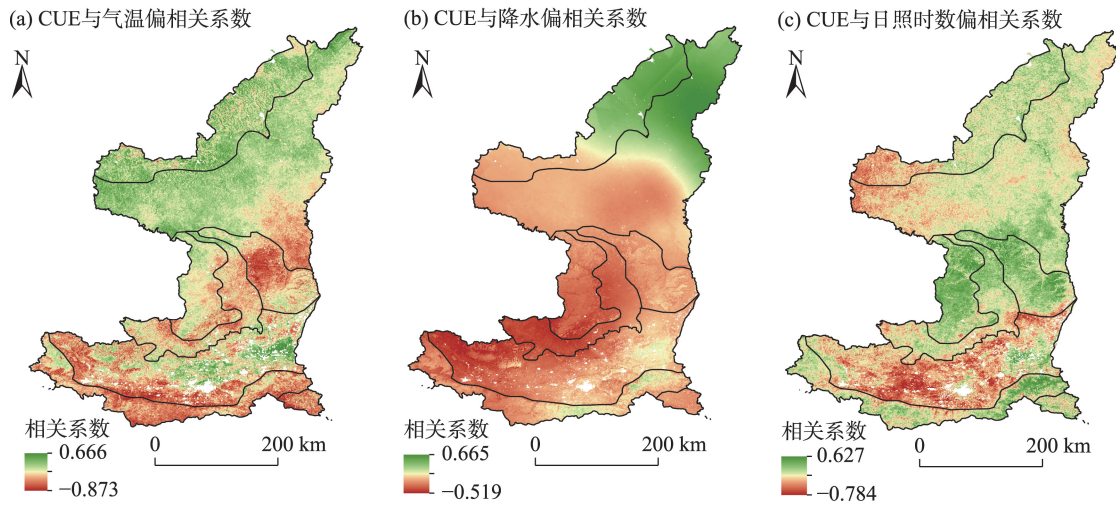


图6 植被CUE与气温(a)、降水(b)及日照时数(c)偏相关关系

Fig. 6 Partial correlation relationship between vegetation CUE and temperature (a), precipitation (b), sunshine hours (c)

风固沙区、关中平原大部分区域(图7a)。与降水敏感性系数负值占区域面积比为69.38%,主要分布在关中平原、陕南天然林保护区及退耕还林区大部地区(图7b)。与日照时数负值区域面积占比为54.45%(图7c),主要分布在关中平原大部地区,陕南退耕还林区部分地区及陕北退耕还林区西部地区。

植被CUE与日照时数的相关性较低,因此,进一步分析植被CUE对气温及降水的敏感性,由表1可以看出,温度 $< 10^{\circ}\text{C}$ 时,陕西黄河流域植被CUE随温度上升而增加,主要分布在陕北防风固沙区及退耕还林区西北部地区,温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 植被CUE随温

度上升而下降。年降水量 $> 500\text{ mm}$ 植被CUE对降水的敏感系数均为负值;在年降水量 $< 500\text{ mm}$ 的区域,降水对植被CUE的敏感系数增加,随降水量的增加植被CUE增大;年降水量在 $500\sim 650\text{ mm}$ 之间,降水对植被CUE的敏感系数缓慢下降,植被CUE随降水量的增加而波动减少;降水量 $> 650\text{ mm}$ 的区域则表现为随降水量增加,降水对植被CUE的负敏感系数降低。年降水量 $< 500\text{ mm}$ 的区域主要分布在陕北防风固沙区,此区域为干旱地区,降水量对植被CUE的敏感性为正,降水量增加植被CUE增加。

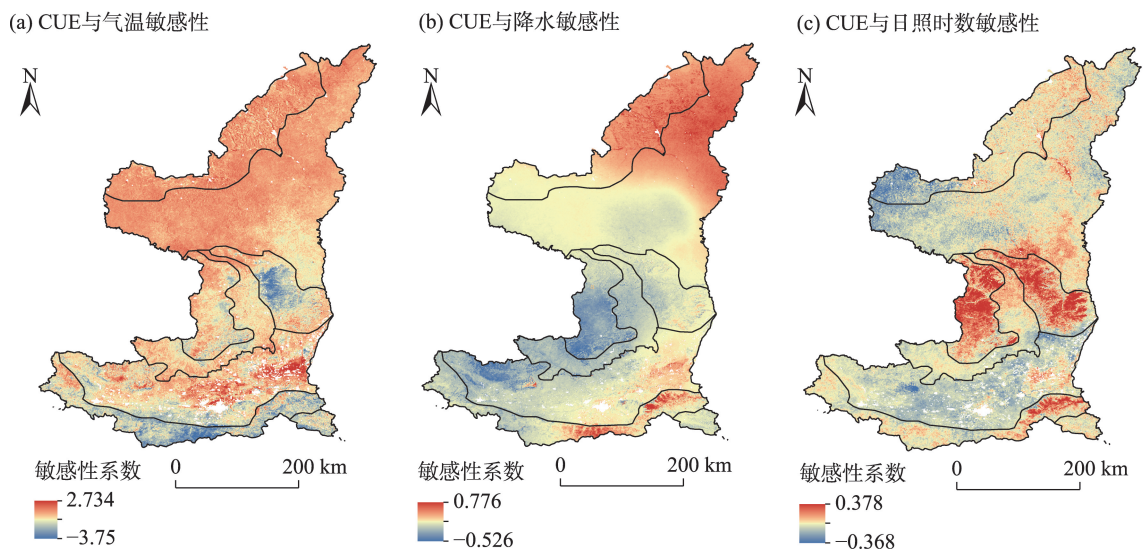


图7 植被CUE与气温(a)、降水量(b)和日照时数(c)敏感性系数的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of sensitivity coefficients between CUE and temperature (a) and precipitation (b), sunshine hours(c)

表1 植被CUE响应气温、降水的敏感性梯度变化

Tab. 1 Gradient change of vegetation CUE sensitivity to temperature and precipitation

气温/℃	气温敏感性系数 ϵ_{tem}	降水量/mm	降水量敏感性系数 ϵ_{pre}
<9	0.108	<400	0.002
9~9.5	0.276	400~450	0.065
9.5~10	0.049	450~500	0.055
10~10.5	-0.233	500~550	-0.025
10.5~11	-0.371	550~600	-0.065
11~11.5	-0.408	600~650	-0.095
11.5~12	-0.425	650~700	-0.021
12~12.5	-0.441	700~750	-0.013
12.5~13	-0.479	750~800	-0.002
>13	-0.493	>800	-0.039

3 讨论

MODIS17A2 HGF 及 MODIS17A3 HGF 数据产品精度较以往版本有所提高,且目前已在不同区域的研究中通过碳通量及其他生态过程模型得到了验证^[22-27],因此,MODIS 产品适用于植被 CUE 研究。植被 GPP、NPP 及 CUE 随覆盖度的增加而增加,且均呈波动中上升的变化趋势,但植被 NPP、GPP 及 CUE 到达高值时间略有不同,植被 GPP 是植被生长通过光合作用吸收转化的有机质总量,在重点生态工程及气候变化作用下,植被逐渐生长壮大,产生的有机质总量不断增加,而 NPP 是经过植被自身的生长和维持代谢消耗后剩余的有机物质量,随着植被生长壮大自身维持代谢的有机质增加,植被 NPP 较 GPP 达到峰值早。陕西黄河流域植被 CUE 均值为 0.51 高于我国平均水平(0.391)及东北森林生态系统(0.45),但低于三江源地区(0.75~1)^[1,8-10],表明研究区植被 CUE 具有较高的水平。研究区植被 CUE 绝大部分区域呈上升趋势,增加较大的区域主要分布在陕北退耕还林区及防风固沙区,这与研究区植被 NPP 变化趋势一致^[13]。通过 Hurst 指数计算表明,植被 CUE 在未来总体呈现下降趋势,其中由上升转为下降的总面积为 55.39%,主要集中在陕北天然林保护区、退耕还林区及防风固沙区大部分区域,仅考虑气候因素,气候暖湿化造成区域植被生长季延长^[28-29],同时光合作用时间增加,植被 GPP 增加,但植被自养呼吸增强,NPP 的增速放缓,因此植被 CUE 将呈下降趋势。

气候因素是影响植被 CUE 变化的重要因素。

结果表明,植被 CUE 与气温总体呈负相关关系,而与降水亦以负相关关系为主。刘洋洋等^[9]对东亚地区植被 CUE 研究表明,我国绝大多数地区植被 CUE 与气温呈现负相关,与降水呈正相关关系,本研究仅与气温呈负相关与此结论相同,植被 CUE 对研究尺度及气候变化的敏感性极强,不同研究尺度及气候变化下植被 CUE 特征及对气候敏感性不尽相同,因此,分析陕西黄河流域植被 CUE 变化及其对气候的响应,能准确地反映区域生态系统碳循环变化状况。植被 CUE 是衡量植物固定并用于生长和繁殖的碳量相对于从大气中吸收的碳量的量度,相关研究表明,当年平均降水量>500 mm 时,植被 CUE 随着降水的增加而降低^[7],近年来区域降水量虽有所增加,但高强度降水频次增加显著(例如暴雨),对植被 CUE 的提高没有显著影响,甚至可能导致植被 CUE 降低。这是因为过高的降水强度会导致土壤表层的压实和流失,损失了土壤水分和养分,进而限制植被的生长和光合作用效率,降低植被 CUE。在年降水量<500 mm 的地区(陕北防风固沙区),植被 CUE 与降水呈正相关,研究发现干旱区域的植被在缺水时会增加光合作用压力,生长素氮的供应减少,进而植被生长速度下降^[30],降水的增加导致光合作用增强,一定程度上减弱植物根系呼吸,从而减小自养呼吸,使得植被 CUE 随降水增加而增加^[7,9]。本研究中植被 CUE 与气温的阈值为 10 ℃,与降水的阈值为 500 mm,小于此阈值的区域为陕北防风固沙区,植被 CUE 随气温升高而增加,此区域气温偏低,植被生长需要一定的温度范围,温度的升高延长了植被生长季,光合作用效率有所提高,因此,植被 NPP、GPP 及植被 CUE 均有所提高,在较为干旱的区

域,植被 NPP 和 GPP 随着水分的增加而增加^[31-32],但植被 NPP 较 GPP 达到高值早,水分的增加将减少植被对根系的投入,降低自养呼吸,使生态系统 NPP/GPP 升高。

植被 CUE 是陆地生态系统碳循环的重要参数^[33]。陕西黄河流域植被 CUE 变化主要集中在陕北退耕还林区及防风固沙区,且均在达到高位时保持波动,未来变化趋势中该区域会转为下降趋势,气候因子对植被 CUE 的影响对植被 CUE 变化产生一定影响,因此,建议今后进一步开展这一区域气候变化背景下生态系统碳循环机理及变化成因研究。

4 结 论

通过利用 MOD17 数据、土地利用数据及气候数据,应用变化趋势预测、敏感性系数等方法,探讨了 2001—2021 年陕西黄河流域植被 CUE 时空变异及其对气候的敏感性,结论如下:

(1) 陕西黄河流域 2001—2021 年植被 GPP 均值为 $627.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且呈现波动增加趋势;植被 NPP 多年均值为 $363.60 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,变化趋势总体与植被 GPP 一致,但增速放缓时间较植被 GPP 提前;区域植被 CUE 均值为 0.51,且呈现波动增加趋势,2014 年后增速放缓。陕西黄河流域植被 CUE 高值区主要分布在陕北防风固沙区及退耕还林区,其均值在 0.6 以上,仅有 14.21% 的区域植被 CUE 呈下降趋势,下降的区域主要分布在关中平原南部及陕南退耕还林区部分地区,但大部分呈不显著下降。

(2) 陕西黄河流域 Hurst 指数平均值为 0.49,植被 CUE 未来总体呈下降趋势,占研究区总面积的 59.96%,其中仅 4.57% 区域呈现持续下降趋势,其他下降的区域为未来由上升转为下降,占总面积的 55.39%,陕北天然林保护区、退耕还林区及防风固沙区大部分区域均由上升转为下降。

(3) 陕西黄河流域大部分区域植被 CUE 与气温及降水呈负相关,植被 CUE 与降水量的变化更为相关,与降水呈显著正相关关系的地区在陕北防风固沙区大部。对气温与降水的敏感系数分析,植被 CUE 与气温及降水的阈值分别为 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 500 mm ,气温 $<10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、降水量 $<500 \text{ mm}$ 时植被 CUE 随气温及降水的增加而增加。

参考文献(References):

- [1] 郑飞鸽,易桂花,张廷斌,等.三江源植被碳利用率动态变化及其对气候响应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 401–413. [Zheng Feige, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Study on spatio-temporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its response to climate factors in Three-River Headwaters Region[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 401–413.]
- [2] 卢雅焱,徐晓亮,李基才,等.基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896–1906. [Lu Yayan, Xu Xiaoliang, Li Jicai, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1896–1906.]
- [3] Choudhury B J. Modeling radiation and carbon use efficiencies of maize, sorghum, and rice[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106(4): 317–330.
- [4] 底阳平,曾辉,张扬建,等.多尺度碳利用效率研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1849–1860. [Di Yangping, Zeng Hui, Zhang Yangjian, et al. Research advances in carbon use efficiency at multiple scales[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1849–1860.]
- [5] Delucia E H, Drake J E, Thomas R B. Forest carbon use efficiency: Is respiration a constant fraction of gross primary production [J]. Global Change Biology, 2007, 13(6): 1157–1167.
- [6] Zhang Y, Xu M, Chen H, et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: Effects of ecosystem type, geographical location and climate[J]. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(3): 280–290.
- [7] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(2): 144–155.
- [8] 安相,陈云明,唐亚坤.东亚森林草地碳利用效率及碳通量空间变化的影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 79–87, 92. [An Xiang, Chen Yunming, Tang Yakun, et al. Factors affecting the spatial variation of carbon use efficiency and carbon fluxes in East Asian forest and grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 79–87, 92.]
- [9] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.2000—2013 年中国植被碳利用效率(植被 CUE)时空变化及其与气象因素的关系[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 278–286, 2. [Liu Yangyang, Wang Qian, Yang Yue, et al. Spatiotemporal dynamic of vegetation carbon use efficiency and its relationship with climate factors in China during the period 2000–2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 278–286, 2.]
- [10] 陈智. 2000—2015 年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1625–1632. [Chen Zhi. Spatiotemporal variation of productivity and carbon use efficiency of forests in Northeast China from 2000 to 2015[J]. Chinese Jour-

- nal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1625–1632.]
- [11] Gang C, Wang Z, Zhou W, et al. Assessing the spatiotemporal dynamic of global grassland water use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 202(5): 343–354.
- [12] 罗赵慧, 朱璐平, 张晓君, 等. 粤港澳大湾区区植被CUE变化及与气候变化的关系[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5793–5805. [Luo Zhaohui, Zhu Luping, Zhang Xiaojun, et al. Spatiotemporal variation of CUE and its correlation with climate change in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5793–5805.]
- [13] 王娟, 何慧娟, 董金芳, 等. 黄河流域植被净初级生产力时空特征及自然驱动因子[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 213–222. [Wang Juan, He Huijuan, Dong Jinfang, et al. Spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in the Yellow River Basin in 2000–2019 and its natural driving factors[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 213–222.]
- [14] 吕锦心, 梁康, 刘昌明, 等. 无定河流域土地覆被空间分异机制及相关水碳变量变化[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 563–572. [Lv Jinxin, Liang Kang, Liu Changming, et al. Spatial differentiation mechanism of land cover and related changes in water-carbon variables in Wuding River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 563–572.]
- [15] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 1–10. [Li Dengke, Wang Zhao. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 1–10.]
- [16] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017. [Chen Yaru. The Response of Forest Productivity and Carbon Storage to Landscape Pattern Change in Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.]
- [17] Jiang C, Wu Z F, Cheng J. Impacts of urbanization on net primary productivity in the Pearl River Delta[J]. International Journal of Plant Production, 2015, 9(4): 1735–6814.
- [18] 吴宗洋, 蔡卓雅, 郭英, 等. 黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(6): 917–927. [Wu Zongyang, Cai Zhuoya, Guo Ying, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis on multi-source remote sensing land cover data in the Yellow River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(6): 917–927.]
- [19] Shi Xun, Andrew E, Xia L. Using spatial information technologies to select sites for biomass power plants: A case study in Guangdong Province[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(1): 35–43.
- [20] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆盖时空分异及驱动因子[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1322–1332. [Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1322–1332.]
- [21] 崔茜琳, 何云玲, 李宗善. 青藏高原植被水分利用效率时空变化及与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1525–1532. [Cui Xilin, He Yunling, Li Zengshan. Spatial-temporal variation of vegetation water use efficiency and its relationship with climate factors over the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1525–1532.]
- [22] Zheng H, Zhang L, Zhu R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Research, 2009, 45: 641–648.
- [23] 袁甲, 沈非, 聂兵, 等. 皖江城市带植被NPP时空变化及其气候响应[J]. 测绘科学, 2017, 42(11): 62–67. [Yuan Jia, Shen Fei, Nie Bing, et al. Temporal-spatial patterns of vegetation net primary productivity and its response to climate factors in Wanjiang City belt based on CASA model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(11): 62–67.]
- [24] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区NPP驱动力分析: 以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2995–3006. [Ji Panpan, Gao Minhua, Yang Xiaodong, et al. Analysis of NPP driving force in an arid region of Northwest China: A case study in Yili Valley and parts of Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2995–3006.]
- [25] 王金杰, 赵安周, 胡小枫. 京津冀植被净初级生产力时空分布及自然驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1158–1167. [Wang Jinjie, Zhao Anzhou, Hu Xiaofeng. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity in Beijing-Tianjin-Hebei and natural driving factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1158–1167.]
- [26] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 8–13. [Zhang Jiping, Liu Chunlan, Hao Haiguang, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters Region based on MODIS GPP/NPP data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 8–13.]
- [27] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区2001—2018年植被净初级生产力时空演变研究[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 1–11. [Hong Xinqian, Huang Yong, Sun Tao. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of southwest China from 2001 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 1–11.]
- [28] 国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000—2006年东北地区植被NPP的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226–1235. [Guo Zhixing, Wang Zongming, Zhang Bo, et al. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006[J]. Resources Science, 2008, 30(8): 1226–1235.]
- [29] Goudie A. Encyclopedia of Global Change[M]. Oxford: Oxford Uni-

- versity Press, 2002: 365–369.
- [30] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. Spatial pattern and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798–810.
- [31] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems[J]. *Human Ecology*, 1973, 1: 303–332.
- [32] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, et al. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status[J]. *Tree Physiology*, 1996, 16: 333–343.
- [33] Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 336–340.

Spatiotemporal characteristics of vegetation carbon use efficiency and its sensitivity to climate in the Yellow River Basin in Shaanxi Province

WANG Juan^{1, 2}, WANG Zhao^{1, 2}, GUO Bin^{3, 4}, HE Huijuan^{1, 2}, DONG Jinfang^{1, 2}

(1. Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crop, Xi'an 710014, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Eco-environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014, Shaanxi, China; 3. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, Sichuan, China; 4. Aba Prefecture Meteorological Administration, Maerkang 624000, Sichuan, China)

Abstract: Vegetation carbon use efficiency (CUE) can objectively reflect the efficiency of vegetation in sequestering atmospheric carbon and the response of vegetation to climate change. Using MOD17, land use, and meteorological data, this study applied methods, such as the Hurst exponent, correlation analysis, and sensitivity analysis to explore the spatiotemporal variability of vegetation CUE and its sensitivity to climate factors in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2001 to 2021. The results showed that (1) From 2001 to 2021, the gross primary productivity, net primary productivity (NPP), and vegetation CUE in the Shaanxi section of the Yellow River Basin exhibited an increasing trend, with an average CUE value of 0.51. (2) The study area was only 14.21% of the region, exhibiting a decreasing trend. The high-value areas of vegetation CUE are primarily concentrated in the windbreak and sand-fixation areas and the Grain for Green Project areas of northern Shaanxi. The areas where vegetation CUE indicated a decreasing trend accounted for 59.96%, most of which transitioned from an increasing trend to a decreasing trend. (3) Overall, temperature and precipitation correlated negatively with vegetation CUE, but the relationship with precipitation is more significant. Regions with positive correlations with temperature and precipitation are distributed in northern Shaanxi's windbreak and sand-fixation areas. Sensitivity analysis of temperature and precipitation showed that the threshold values were 10 °C and 500 mm, respectively. When the temperature is below 10 °C and the precipitation is below 500 mm, the vegetation CUE increases with increasing temperature and precipitation. The relationship between vegetation CUE and climate factors is more significant and sensitive in arid areas, such as the conversion of farmland to forests and windbreak and sand-fixation areas in northern Shaanxi.

Keywords: vegetation CUE; spatiotemporal characteristics; Hurst; climate factors; sensitivity; Yellow River Basin